

## Plataforma de control de bajo coste para incubadoras de perdices basada en sensores ambientales y de gases

J.García-Hierro<sup>1</sup>, J.I.Robla<sup>1</sup>, P.Barreiro<sup>2</sup>, B.Diezma<sup>2</sup>, E.C.Correa<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Tecnologías Avanzadas en Sensores, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Av. Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid ([j.hierro@cenim.csic.es](mailto:j.hierro@cenim.csic.es))

<sup>2</sup>Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación, Departamento de Ingeniería Rural, E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, CEI Moncloa, Av. Complutense s/n, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid

<sup>3</sup>Departamento de Ciencia y Tecnologías Aplicadas a la Ingeniería Técnica Agrícola, E.U.I.T. Agrícola, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense s/n, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid

### Resumen

Las incubadoras de huevos requieren un buen control de la temperatura (37.5-37.8 °C) y de la humedad relativa (45-60%) durante todo el proceso de incubación. Aunque la concentración de dióxido de carbono es determinante para establecer una buena tasa de ventilación, así como para determinar el estado de proceso de desarrollo de los embriones (De Smit et al., 2006; Han et al., 2011), las incubadoras industriales normalmente no incorporan sensor de CO<sub>2</sub>.

En trabajos previos de los autores se realizó la modelización del gradiente de temperatura y humedad relativa en el interior de una incubadora semi-industrial usando una red tridimensional de sensores, observándose que las variaciones espaciales eran despreciables; haciendo posible usar un único sensor en un punto de control. En dichos ensayos previos se emplearon módulos comerciales de adquisición de datos y de control, cuyo principal inconveniente es el coste considerando el perfil del usuario final: empresario cinegético a tiempo parcial en esta actividad.

En la actualidad existen diversas plataformas de hardware y software libre con un bajo coste que se pueden emplear para controlar y monitorizar procesos a través de sus entradas y salidas digitales y analógicas. Una de estas plataformas es Arduino, creada en 2005 como una herramienta para estudiantes.

En este trabajo se presenta el diseño y validación de un sistema de control de una incubadora industrial de perdices, empleando un sensor de temperatura y humedad relativa y un sensor de CO<sub>2</sub> basado en la tecnología de infrarrojo no dispersivo (NDIR), conectados a una placa Arduino<sup>TM</sup> MEGA. La producción de CO<sub>2</sub> se ha empleado para modelizar el desarrollo embrionario de los huevos, y estimar el punto final de la incubación. Se dispone de datos relativos a la tasa de nacimientos, en todos los casos cercana al 70%; muy elevado considerando que se desconoce la tasa inicial de huevos fecundados.

Palabras clave: producción animal, tasa de respiración.

## Low-cost control platform for partridges incubators based on ambient and gas sensors

### Abstract

Poultry incubators require a good control of temperature (37.5-37.8 °C) and relative humidity (45-60%) during the incubation process. Though carbon dioxide is critical to determine a good ventilation rate and to determine the state of process of embryo development (De Smit et al., 2006; Han et al., 2011), incubators typically do not incorporate CO<sub>2</sub> sensor.

In previous authors' works, the gradient of temperature and relative humidity inside an industrial incubator has been modeled using a three-dimensional network of sensors, observing that spatial variations were negligible; making it possible to use a single sensor in a control point. In these preliminary tests commercial modules were used for data acquisition and control, whose main drawback is the cost, considering the end user profile: part-time entrepreneur in this activity.

At present there are some open source and low-cost platforms that can be used to control and monitor processes through using their analog and digital I/O. One of these platforms is Arduino, created in 2005 as a tool for students.

This paper presents the design and validation of a control system for an industrial partridges incubator using a temperature and relative humidity sensor and a CO<sub>2</sub> sensor based on non-dispersive infrared technology (NDIR) connected to an Arduino<sup>TM</sup> MEGA board. CO<sub>2</sub> production was used to model the embryonic development of the eggs, and to estimate the end point of incubation. Data of the birth rate are available, in all cases about 70%, very high considering that the initial rate of fertilized eggs is unknown.

Keywords: animal production, respiration rate.

## Introducción

Normalmente las incubadoras industriales de aves no incorporan sensores de CO<sub>2</sub> para supervisar la generación de una atmósfera controlada a pesar de que la concentración de dicho gas es determinante para obtener una mejor tasa de nacimientos. La ausencia de ventilación en la incubadora durante los primeros 10 días hasta alcanzar niveles de CO<sub>2</sub> del 0.7% (7000 ppm) acelera el proceso de incubación y un aumento gradual del nivel de CO<sub>2</sub> hasta alcanzar el 1.5% (15000 ppm) acelera el crecimiento de los embriones y el nacimiento, además de mejorar la tasa de nacimientos en pollos y pavos (De Smit et al., 2006; Tona et al., 2007).

Por otra parte, la ascitis es una de las principales causas de mortalidad de pollos criados en granja. Su etiología puede encontrarse durante el desarrollo embrionario (Coleman and Coleman, 1991). Buys (1998) y De Smit (2008) demuestran que un aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> tanto durante los 10 primeros días de incubación, como en la última semana, mejora la resistencia de los pollos nacidos a dicha patología.

El crecimiento celular de un embrión es inicialmente exponencial y posteriormente se desacelera hasta alcanzar un límite máximo de crecimiento debido al espacio limitado del interior del huevo, aspecto ya descrito por Verhulst en 1838. La producción de dióxido de carbono debe ser proporcional a dicho crecimiento y por lo tanto el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el espacio confinado de la incubadora tiene relación con el número de embriones en crecimiento y podría utilizarse para estimar la tasa de nacimientos final. Esta es la hipótesis de partida de este estudio. Se pretende emplear la supervisión de la concentración de CO<sub>2</sub> como base para un control inteligente de la incubadora.

## Material y Métodos

### Incubaciones

Se han empleado un total de 25.184 huevos de perdiz española sin discriminación de fecundación, en tres incubaciones consecutivas (7.040, 9.072 y 9.072). Los huevos se introducen en una incubadora comercial VICTORIA con temperatura y humedad relativa controlada, durante 21 días. Cada hora la máquina realiza un volteo automático de los huevos (de 45° a 135° y viceversa). Las condiciones de experimentación son equivalentes a las de un proceso de incubación normal: 37.7°C y 40% de humedad relativa. Se parte de una concentración de CO<sub>2</sub> ambiental en torno a 550 ppm (tabla 1). El control normal de la incubadora se realiza a través de una sonda PT100 conectada a un regulador de temperatura que activa un relé que aporta corriente a dos resistencias eléctricas de calefacción de 2 kW cada una. La sonda PT100 está situada en la parte central del techo interior de la incubadora. Para el control de humedad emplea un psicrómetro conectado a un regulador que igualmente tiene una salida de relé para poner en marcha un rodillo humectante. El único intercambio de aire se produce por ventilación natural a través de una rejilla de 225 cm<sup>2</sup> en la parte superior de la incubadora.

## Sistema de Control

Como dispositivo de control se ha empleado un sensor SENSIRION SHT75. Es un sensor digital que mide conjuntamente temperatura y humedad relativa con una precisión de  $\pm 0.3$  °C y  $\pm 1.8\%$ , respectivamente, en los rangos de 10-40°C de temperatura y 10-90% de humedad. El SENSIRION SHT75 es un sensor pequeño y con muy bajo consumo, que junto a su gran estabilidad y repetibilidad lo hacen adecuado para su empleo en gran cantidad de aplicaciones. En trabajos previos del autor (García-Hierro et al., 2012) se han monitorizado procesos de incubación completos empleando una red tridimensional de sensores, observándose que las variaciones espaciales eran despreciables. Por ello, es posible emplear un único sensor en el centro geométrico de la pared superior de la incubadora (punto de control).

Para monitorizar el CO<sub>2</sub> producido durante la incubación se utiliza el sensor EE82-5C2 de E+E ELEKTRONIK. Es un dispositivo basado en un detector infrarrojo no dispersivo (NDIR) de pequeño tamaño y muy bajo consumo. Se ha elegido un sensor calibrado para el rango entre los 0 y 5000 ppm con una precisión de 50 ppm, con salida analógica lineal entre 0 y 5 V.

Se ha empleado un dispositivo ARDUINO MEGA2560 para la comunicación con los sensores y el control de las resistencias de calefacción y el rodillo de humectación. La placa ARDUINO posee un microprocesador ATMEL ATmega 2560, con 54 salidas/entradas digitales y 16 entradas analógicas. Emplea lenguaje de programación basado en “wiring”, compatible con gran número de librerías Java y C/C++ (Kornuta et al., 2013). Tiene un entorno de programación propio que es el que se ha empleado para programar la placa (Arduino 1.5 para Windows). Para el registro de datos y la monitorización se ha conectado a un PC a través del puerto USB, tomando datos con una frecuencia de 1 medida cada 3 minutos.

Arduino es una plataforma cada día más usada en investigación y experimentación ya que existe una comunidad muy activa que ofrece muchas adaptaciones de hardware y centenares de programas libres para muchas aplicaciones (D'Ausilio, 2012).

## Análisis del dióxido de carbono

Para el análisis de la variación de la concentración de dióxido de carbono a lo largo del proceso de incubación se emplea la función de Verhulst (Ecuación 1). Se emplea dicha función ya que, de acuerdo con la biología tradicional, la producción de CO<sub>2</sub> es proporcional al desarrollo celular de los embriones.

$$y = \frac{y_0 \cdot K}{y_0 + (K - y_0) \cdot e^{-rt}} \quad (1)$$

Donde  $y$  = concentración de CO<sub>2</sub> en un instante dado (ppm),  $y_0$  = concentración inicial de CO<sub>2</sub> (ppm),  $K$  = concentración límite de CO<sub>2</sub> (ppm),  $t$  = tiempo (s),  $r$  = tasa de crecimiento (s<sup>-1</sup>)

Se propone además otra función sigmoidea para el ajuste:

$$y = c + d \frac{e^{at+b}}{1 + e^{at+b}} \quad (2)$$

Donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son parámetros de ajuste,  $y$  = concentración de CO<sub>2</sub> en un instante dado (ppm) y  $t$  = tiempo (s)

Dichas funciones se simulan en MATLAB empleando la función “fitttype”.

## Resultados y Discusión

En las 3 incubaciones se obtienen buenos resultados de tasa de nacimientos, teniendo en cuenta que no hay una discriminación inicial de huevos fecundados.

**Tabla 1.** *Resumen incubaciones*

FECHA	Huevos introducidos	Nacidos	% Nacimientos
13-03-2012	7040	5133	72.3
06-04-2012	9072	6951	76.6
30-04-2012	9072	6523	71.9

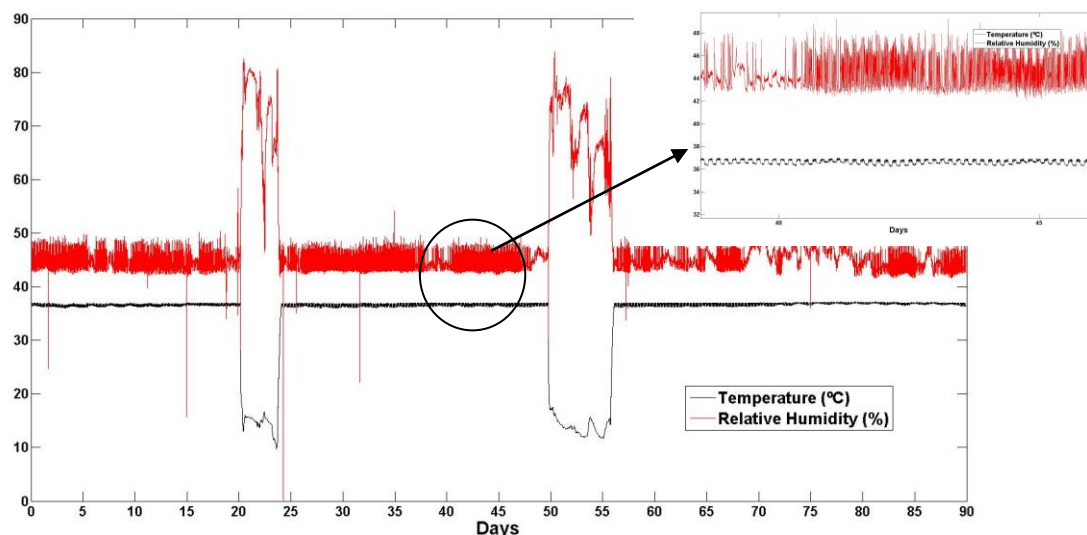
Los resultados de nacimientos son prácticamente equivalentes a los obtenidos en trabajos anteriores.

**Tabla 2.** *Resumen de incubaciones llevadas a cabo en el trabajo de J. Garcia-Hierro (2012)*

FECHA	Huevos introducidos	Nacidos	% Nacimientos
03/05/11	9200	6486	70.5
24/05/11	9200	6817	74.1

## Temperatura y Humedad Relativa

Los resultados del control de la incubadora son plenamente satisfactorios no influyendo en la tasa normal de nacimientos. En la Figura 1, se distinguen los 3 periodos de incubación distintos así como los momentos en los que se abre la incubadora.



**Figura 1.** Variación de la Temperatura (°C) y Humedad Relativa (%) durante el experimento.

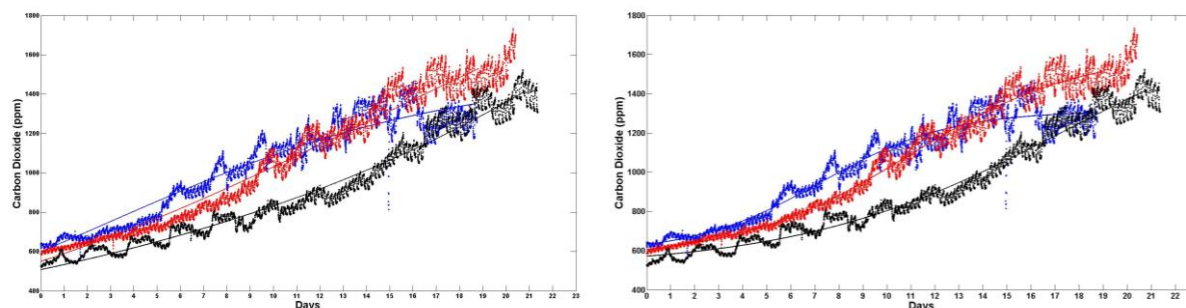
En la parte superior-derecha de la Figura 1 se presenta una zona ampliada donde se puede apreciar los ciclos de encendido y apagado de las resistencias eléctricas, así como de la puesta en marcha del rodillo de humectación. El control de temperatura es mucho mejor que el de la humedad relativa como se desprenden de los resultados presentados en la tabla 3. El coeficiente de variación de Pearson de la humedad relativa es 6 veces mayor que el de la temperatura, por lo que sería interesante mejorar el control del sistema de humectación.

**Tabla 3.** Temperatura y humedad relativa eliminando los periodos de apertura de la incubadora

	Media (x)	Desviación estándar (s)	Coefficiente de variación (s/x)·100
Temperatura (°C)	37.45	0.19	0.51
Humedad (%)	42.85	1.31	3.05

### Dióxido de Carbono

En la Figura 2 se muestra la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> a lo largo de los 3 procesos de incubación. Se aprecia como la concentración de dióxido de carbono aumenta a lo largo del proceso de incubación debido al resultado del metabolismo en el interior de huevo durante el desarrollo embrionario. Partiendo de concentraciones similares de dióxido de carbono, se observa que se alcanzan concentraciones finales diferentes. Como era de esperar, a mayor número de pollos nacidos, mayor concentración límite de CO<sub>2</sub>.



**Figura 2.** Ajuste empleando ecuación 1 (izquierda) y ecuación 2 (derecha)

**Tabla 4.** Comparación de los datos de ajuste de las curvas de CO<sub>2</sub> y los datos experimentales obtenidos.

FECHA	13-03-2012	06-04-2012	30-04-2012
COLOR	Azul	Rojo	Negro
<b>Ajuste Verhulst (ecuación 1)</b>			
y <sub>0</sub> (ppm)	600	550	514
K (ppm)	1509	2536	6433
r(s <sup>-1</sup> )·10 <sup>6</sup>	1.586	1.048	0.706
R <sup>2</sup>	0.9291	0.9682	0.9610
<b>Ajuste sigmoide propuesto (ecuación 2)</b>			
a (s <sup>-1</sup> )· 10 <sup>6</sup>	4.371	3.236	1.717
b	-2.641	-3.055	-2.720
c (ppm)	574.1	559.1	455
d (ppm)	727.7	1054	1614
c+d (ppm)	1301.8	1613.1	2069
R <sup>2</sup>	0.9489	0.9786	0.9718
<b>Datos Experimentales</b>			
CO <sub>2</sub> inicial (ppm)	624	583	538
CO <sub>2</sub> a 21 días (ppm)	1256	1701	1311
Numero datos	9000	9800	10255

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados de ajuste. El coeficiente R<sup>2</sup> explica la bonanza del ajuste lineal y en los tres casos es mejor empleando la ecuación sigmoidea que hemos propuesto. El ajuste de Verhulst obtiene un valor inicial mejor para la concentración de CO<sub>2</sub> inicial, pero siempre predice concentraciones de CO<sub>2</sub> final mucho más altas. En cambio, el ajuste propuesto en la Ecuación (2) obtiene unos valores límites de CO<sub>2</sub> (c+d) bastante cercanos a los experimentales.



## Conclusiones

Se ha comprobado que es viable el seguimiento del proceso de incubación con sistemas de bajo coste, haciendo posible reducir los costes de fabricación de incubadoras de laboratorio o industriales. La supervisión del nivel de CO<sub>2</sub> permite evaluar el nivel de actividad fisiológica de los embriones de los huevos.

El empleo de modelos logísticos permitirá la predicción in situ tanto de la duración óptima del proceso de incubación, como de la tasa de nacimientos final.

Este estudio demuestra que existe la posibilidad de emplear en el futuro un sistema de control inteligente de bajo coste basado en una plataforma libre tipo Arduino.

## Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado gracias a los proyectos de investigación Smart-QC (AGL2008-05267-C03-03) y el proyecto A/030569/10 de la AECID.

Además nos gustaría dar las gracias a Francisco Pérez y Ángel López de la FINCA CINEGÉTICA DEHESA VIEJA de Galapagar, por la prestación de sus instalaciones.

## Bibliografía

- Buys, N., Dewil, E., Gonzales, E., and Decuyper, E. (1998). Different CO<sub>2</sub> levels during incubation interact with hatching time and ascites susceptibility in two broiler lines selected for different growth rate. *Avian Pathology* 27, 605-612.
- Coleman, M. A., and Coleman, G. E. (1991). Ascites control through proper hatchery management. *Misset World Poultry* 7, 33-35.
- D'Ausilio, A. (2012). Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment. *Behavior Research Methods* 44, 305-313.
- De Smit, L., Bruggeman, V., Debonne, M., Tona, J. K., Kamers, B., Everaert, N., Witters, A., Onagbesan, O., Arckens, L., De Baerdemaeker, J., and Decuyper, E. (2008). The effect of nonventilation during early incubation on the embryonic development of chicks of two commercial broiler strains differing in ascites susceptibility. *Poultry Science* 87, 551-560.
- De Smit, L., Bruggeman, V., Tona, J. K., Debonne, M., Onagbesan, O., Arckens, L., De Baerdemaeker, J., and Decuyper, E. (2006). Embryonic developmental plasticity of the chick: Increased CO<sub>2</sub> during early stages of incubation changes the developmental trajectories during prenatal and postnatal growth. *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* 145, 166-175.
- García-Hierro, J., Robla, J. I., Barreiro, P., Diezma, B., and Correa-Hernando, E. (2012). DESIGN OF A SOLAR INCUBATOR. PART 1: MONITORING TEMPERATURE AND ENTHALPY GRADIENTS UNDER COMMERCIAL PRODUCTION. In "INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING- CIGR-AgEng2012", pp. 85, Valencia.
- Han, H. B., Li, X., Yu, K., and Lian, Z. X. (2011). Effects of Different CO<sub>2</sub> Levels on Chicken Embryonic Development During Early Stage of Incubation. *Journal of Animal and Veterinary Advances* 10, 2624-2630.
- Kornuta, J. A., Nipper, M. E., and Dixon, J. B. (2013). Low-cost microcontroller platform for studying lymphatic biomechanics in vitro. *Journal of Biomechanics* 46, 183-186.
- Tona, K., Onagbesan, O., Bruggeman, V., De Smit, L., Figueiredo, D., and Decuyper, E. (2007). Non-ventilation during early incubation in combination with dexamethasone administration during late incubation: 1. Effects on physiological hormone levels, incubation duration and hatching events. *Domestic Animal Endocrinology* 33, 32-46.